

## 光测电能的研究<sup>1</sup>

陈新桥 吴迅雷 陈纪东\* 罗方亮\* 乔松\* 丁耀根

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

\*(中国矿业大学基础科学系 北京 100083)

**摘 要** 该文提出了利用某些透明介质的法拉第 (Farady) 效应和普克尔斯 (Pockels) 效应以及单片机进行电能的光测新方法, 全面系统地论述了这种方法的原理, 介绍了作者设计的光测电能实验系统, 给出了实验结果。研究表明, 理论分析与实验结果相吻合, 证明了电能光测的可行性。

**关键词** 磁光效应, 普克尔斯效应, 光调制, 单片机

**中图分类号** TN29, TM933.4

### 1 引言

对电能进行测量的仪器称为电度表, 传统的电度表主要为感应系的电度表, 它是利用电磁感应原理进行测量的<sup>[1]</sup>。现有的电度表的不足之处主要表现在以下几方面。接线复杂, 易于接错; 用了两个线圈以及许多其他机械部件, 用材料较多; 机械转动引起的摩擦力较大, 在负载小的时候转不起来, 因此产生较大误差; 校正机制复杂; 对于高电压、大电流的电路中电能的测量, 还要增加笨重的电流、电压互感器; 测量系统易短路。

随着近代光测技术的发展, 特别是光学传感器技术的发展, 人们已经开始着手研究利用光学传感器来测量电力系统的电学参量, 人们已经对光测电流、光测电压进行了系统的研究并取得了可喜的成绩, 基本上实现了对电流、电压的光测<sup>[2,3]</sup>。中国矿业大学所立煤科基金项目已对大电流、高电压的光测做了系统的研究<sup>[4-6]</sup>。

### 2 光测电能原理

电能的计量是通过对电路所消耗的有功功率对时间的积分来得到的。我们首先利用光学传感技术对有功功率进行光测, 然后利用单片机对有功功率进行积分。

对有功功率的光测我们采用的是组合光调制的方法。光束经电光磁光组合调制后, 将光束信号中包含的电功率的信息, 通过滤波器提取出来。

**2.1 组合光调** 组合光调制是把电光调制和磁光调制组合起来进行光调制的方法, 它分为两种组合方式。一种是电光调制在前, 磁光调制在后; 另一种是磁光调制在前, 电光调制在后。这两种情况输出光强信号所含信息不同。我们采用矩阵分析的方法进行分析, 详细分析如下。

**2.1.1 电光调制在前, 磁光调制在后** 实验框图如图 1 所示, 令  $G_1, G_{\lambda/4}, G_C, G_F, G_2$  分别为起偏器  $P_1$ ,  $\lambda/4$  波片、电光晶体  $C$ , 磁光晶体  $F$ , 检偏器  $P_2$  的琼斯矩阵<sup>[7]</sup>,  $E_o, E_i$  分别为通过  $P_1$  和  $P_2$  的输入光矢和输出光矢。

<sup>1</sup> 2000-10-20 收到, 2001-02-05 定稿  
煤科基金资助项目

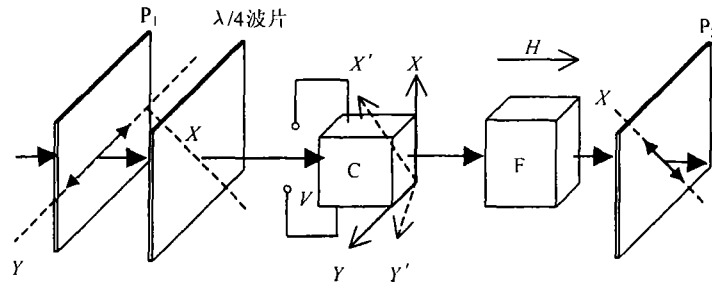


图 1 组合光调制实验框图

由检偏器  $P_2$  出射的光矢量为

$$\begin{aligned} E_o &= G_2 G_F G_C G_{\lambda/4} G_1 E_i \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -i \end{bmatrix} \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} E_{ix'} \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta + \sin \theta e^{-i\delta} \\ 0 \end{bmatrix} E_{ix'} \end{aligned}$$

则输出光强为

$$P_o = E_o^* E_o = E_{ix'}^2 [1 + \sin 2\theta \sin \delta] = \frac{1}{2} P_i [1 + \sin 2\theta \sin \delta]$$

式中  $P_i = 2E_{ix'}^2$  为入射光强,  $\delta$  为电光晶体产生的相位差,  $\theta$  为磁光玻璃的磁旋角。从上式中可见, 输出光强信号中既含有电光调制信号  $\delta$ , 又含有磁光调制信号  $\theta$ 。

2.1.2 磁光调制在前, 电光调制在后 对于磁光调制在前, 电光调制在后的情况, 我们简单把上图中的电光调制和磁光玻璃位置交换, 而其他的光学元件的位置不变, 取向也不变。  $\lambda/4$  快轴沿  $X'$  方向, 加磁场后磁光玻璃在迎光看时产生逆时针磁旋角。此时由检偏器出射的光矢量和光强分别为

$$E_o = G_2 G_C G_{\lambda/4} G_F G_1 E_i = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & 0 \end{bmatrix} E_{ix'}, \quad P_o = E_o^* E_o = \frac{1}{2} P_i (1 - \sin 2\theta)$$

从上式中可见输出光强信号中只包含磁光调制  $\theta$  的信号, 没电光调制  $\delta$  信号。如果  $P_2$  的偏振方向与  $X'$  轴成任意角  $\varphi$ , 它的琼斯矩阵变为  $G_2 = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi & (1/2) \sin 2\varphi \\ (1/2) \sin 2\varphi & \sin^2 \varphi \end{bmatrix}$ , 这时从检偏器  $P_2$  出射光矢量和光强分别为

$$\begin{aligned} E_o &= G_2 G_C G_{\lambda/4} G_F G_1 E_i, \quad P_o = E_o^* E_o \\ P_o &= [\cos^4 \varphi (1 - \sin 2\theta) + \sin^4 \varphi (1 + \sin 2\theta) + (1/2) \sin^2 \varphi - \sin 2\varphi \sin \delta \cos 2\theta] P_i / 2 \end{aligned}$$

可见这时上式既有电光调制  $\delta$  信息, 又有磁光调制  $\theta$  信息。

当  $\varphi = 0$  时,  $P_o = \frac{1}{2} P_i (1 - \sin 2\theta)$ ; 当  $\varphi = \pm \frac{\pi}{4}$  时,  $P_o = \frac{1}{2} P_i [\frac{3}{2} - \cos 2\theta \sin \delta]$ ; 当  $\varphi = \frac{\pi}{2}$  时,  $P_o = \frac{1}{2} P_i (1 + \sin 2\theta)$ 。

2.2 光测电功率原理<sup>[8]</sup> 我们应用前面所述的组合光调制 (电光调制在前) 来实现对电功率的光测, 其原理是这样: 由前面公式所得的  $P_o = \frac{1}{2} P_i (1 + \sin 2\theta \sin \delta)$  可见, 检偏器  $P_2$  输出的光强由两部分组成, 第一项代表  $P_2$  输出的无电压、电流调制时光强的大小, 经光电转换后, 其

值定义为光强的参考电平，第二项为光强经电流、电压调制后的信息项。考虑到实际测量时  $2\theta$  和  $\delta$  很小，这时有  $\sin 2\theta \approx 2\theta$ ,  $\sin \delta \approx \delta$ 。我们知道<sup>[5,6]</sup>， $\delta = \pi V/V_\pi$ ,  $\theta = V_I I$ ，其中  $V_\pi$  为电光晶体的半波电压， $V_I$  为磁光玻璃的维尔德常数，则有

$$P_o = \frac{1}{2} P_i (1 + \sin 2\theta \sin \delta) = \frac{1}{2} P_i + \frac{1}{2} P_i A I V$$

式中  $A = 2\pi V_\pi / V_I$  为常数，可见上式的第二项  $(1/2) P_i A I V$  与电流和电压的乘积成正比，或者说与瞬时功率成正比。瞬时功率：

$$W = IV = I_o V_o \cos \omega t \cos(\omega t + \phi) = I_o V_o (\cos^2 \omega t \cos \phi - \cos \omega t \sin \omega t \sin \phi)$$

通常我们所要测量的不是瞬时功率，而是它在一个周期内的平均值，即平均功率。平均功率又分为有功功率  $W_{有功}$ 、无功功率  $W_{无功}$ 、视在功率  $W_{视在}$ ，它们分别表示为

$$W_{有功} = \frac{1}{2} I_o V_o \cos \phi, \quad W_{无功} = \frac{1}{2} I_o V_o \sin \phi, \quad W_{视在} = \frac{1}{2} I_o V_o$$

一般需要测量的是  $W_{有功}$ 。考虑到上面的关系，这时有

$$\bar{P}_o = \frac{1}{2} P_i + \frac{1}{2} P_i A \left( \frac{1}{2} I_o V_o \cos \phi \right) = \frac{1}{2} P_i + \frac{1}{2} P_i A W_{有功}$$

上面输出光强经光电转换后以弱电压输出，可表示为

$$U_o = k P_o = \frac{1}{2} k P_i + \frac{1}{2} k P_i A W_{有功} = U_i \pm U_i A W_{有功}$$

式中  $k$  为光电转换系数， $U_i = \frac{1}{2} k P_i$  为光强参考电平。上式右边项为直流成分。用低通滤波器提取上式中的直流成分，减去参考电平，最后取正值，可得到有功功率  $W_{有功} = [1/(U_i A)] |U_o - U_i|$ 。当参考电平  $U_i$  足够稳定时，可把  $1/(U_i A)$  作为标定系数看待，可以看到  $W_{有功}$  与  $U_o$  成线性关系。

### 3 光测电能实验的设计

3.1 光测电能实验设计框图 光测电度表实验是在光床开路做的。光测电度表实验的设计框图如图 2 所示。

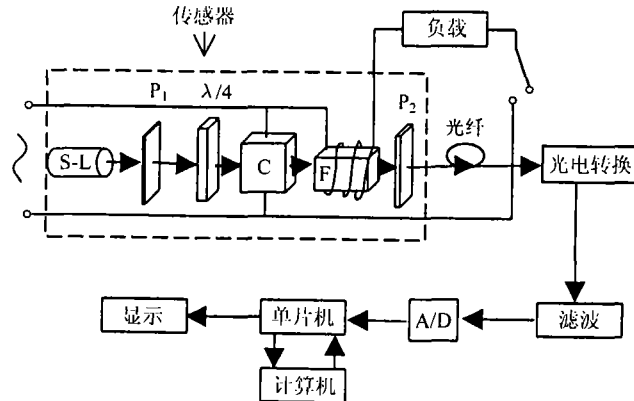


图 2 光测电能的实验设计框图

图中 S-L 为半导体激光器,  $P_1$  为起偏器,  $\lambda/4$  为四分之一波片, C 为电光晶体, F 为磁光玻璃,  $P_2$  为检偏器。从半导体激光器中发射出的光经过 C, F 分别进行电光、磁光的组合调制后, 经光电转换后把光强信号转换为电压信号, 然后送到滤波器进行滤波, 经滤波器滤波出所需要的含有功率信息的电压信号, 然后送入 A/D 转换器把模拟量转换成数字量, 然后再送入单片机进行数据处理, 单片机按一定的时间间隔 (如 0.1s) 从 A/D 中读取数据, 把每个数据乘以时间间隔数后送入累加器进行累加, 也就是进行积分运算, 然后把累加后的数据乘一常数 (该常数应综合考虑电路系数和时间间隔, 可以通过实验进行确定) 后送入到某一储存单元进行储存, 按一定的时间间隔显示储存的数据, 显示的数据就是所测电度数。

3.2 实验结果 本实验我们是每隔 0.5 min 测量一次数据, 图表中“电度表读数”为电度表转盘转动的转数, 我们所用的电度表每转的电度数为  $4 \times 10^{-4} \text{kWh}$ , “单片机读数”为单片机显示的电度的相对数。我们把实验数据作图如图 3 所示。

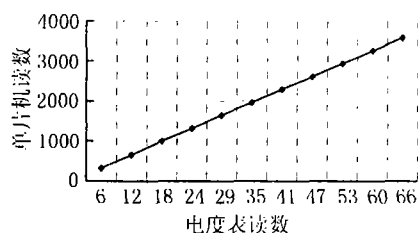


图 3 光测电能实验

实验表明, 光测电能的结果与电磁式电度表所测结果对比, 它们成良好的线性关系。

#### 4 结束语

本文主要用光纤传感器和单片机对电能进行光测, 它不论从原理上还是从方法上与传统的电磁感应系电度表有根本的区别, 是对传统的电磁测量方法的改进, 相比感应系电度表而言光测电度表具有许多优点, 其主要优点表现在: 由于传感器可以做得很小, 用材较少, 如果是批量生产的话, 成本低, 因此造价较低, 体积小; 由于是光信号传输, 受电磁干扰较小, 因而抗干扰能力强; 由于传感器是用绝缘性较好介质材料作成, 因而绝缘性较好, 不容易短路; 不用机械转动, 误差较小, 而且节约了有色金属; 精确度高, 经分析精度可达到现有电度表的 100 倍以上, 且动态范围大。电度表是电仪器仪表品种中生产和使用数量最多的一种, 凡是用电能的地方几乎都有电度表, 因此电度表的研究及改进具有非常重要的应用价值。

#### 参 考 文 献

- [1] 王德聪, 等, 电度表接线, 北京, 机械工业出版社, 1978, 74-77.
- [2] 彭吉虎, 等, 光纤技术及应用, 北京, 北京理工大学出版社, 1995, 225.
- [3] 张国顺, 等, 光纤传感技术, 北京, 水利电力出版社, 1990, 54.
- [4] 何 斌, 等, 新型大电流测量系统, 煤炭学报, 1995, 20(3), 83-85.
- [5] 乔 松, 磁光效应机制与测定, 中国矿业大学学报, 1987, 15(5), 41.
- [6] 乔 松, 等, 光测高压与分电平脉冲计算法, 中国矿业大学学报, 1994, 23(3), 20-25.
- [7] 梁廷廷, 等, 物理光学, 杭州, 浙江大学出版社, 1988, 98-101.

- [8] Qiao Song, Chen Jidong, Light modulation combining Pockels effect with Farady effect and its functions, *Journal of China University of Mining & Technology*, 1996, 25(3), 18-20.

## STUDY ON OPTICAL METHOD TO MEASURE ELECTRIC ENERGY

Chen Xinqiao    Wu Xunlei    Chen Jidong\*  
Luo Fangliang\*    Qiao Song\*    Ding Yaogen

*(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)*

*\*(China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)*

**Abstract** The new optical methods for measuring electric energy utilizing the Faraday's magneto-optical effect and the Pockel effect of some transparent material with single chip computer technology are proposed in this paper. The principle is discussed comprehensively and systematically. The optical measuring electric energy system designed by writer has been introduced. The experimental results are presented. The study shows that the theoretical analysis coincides with experimental results. It proves that the optical measuring electric energy system is effective.

**Key words** Magneto-optical effect, Pockels effect, Optical modulation, Single chip computer

陈新桥: 男, 1965年生, 讲师, 博士生, 研究方向: 激光应用, 微波器件.  
吴迅雷: 男, 1966年生, 讲师, 博士生, 研究方向: 微波器件.  
陈纪东: 男, 1962年生, 副教授, 研究方向: 激光应用.  
罗方亮: 男, 1958年生, 教授, 研究方向: 激光应用.  
乔松: 男, 1928年生, 教授, 博士生导师, 研究方向: 激光应用.  
丁耀根: 男, 1942年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 微波电子学.